



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 43 25 878 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
**G 01 N 29/04**  
G 01 N 29/18  
B 23 K 11/12  
G 01 D 3/02  
G 01 B 17/00  
G 01 D 3/04

⑳ Aktenzeichen: P 43 25 878.6  
㉔ Anmeldetag: 2. 8. 93  
㉕ Offenlegungstag: 24. 2. 94

DE 43 25 878 A 1

③0 Innere Priorität: ③2 ③3 ③1  
31.07.92 DE 42 25 251.2

⑦1 Anmelder:  
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der  
angewandten Forschung eV, 80636 München, DE

⑦4 Vertreter:  
München, W., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 80689  
München; Steinmann, O., Dr., Rechtsanw., 8000  
München

⑦2 Erfinder:  
Waschkies, Eckhard, Dr., 66440 Blieskastel, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren zur Bewertung von Widerstandsschweißverbindungen

⑤7 Beschrieben wird ein Verfahren zur on-line-Bewertung von Schweißvorgängen und insbesondere von Widerstandsschweißungen, unter Verwendung einer Ultraschallquelle, die den Schweißbereich mit Scherwellen beaufschlagt, und eines Ultraschallempfängers.  
Das erfindungsgemäße Verfahren weist folgende Schritte auf:  
- aus dem Ausgangssignal des Ultraschallempfängers wird der Zeitpunkt  $t_s$  ermittelt, an dem die Schmelztemperatur  $T_s$  des Schweißgutes erreicht wird, und sich eine Schweißlinse zu bilden beginnt,  
- aus der Schwächung der Scherwellen nach dem Erreichen der Aufschmelztemperatur wird während des Schweißvorganges das Schweißlinsenvolumen  $V$  berechnet.

DE 43 25 878 A 1

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Bewertung von Schweißvorgängen und insbesondere von Widerstandsschweißungen, unter Verwendung einer Ultraschallquelle, die den Schweißbereich mit Ultraschall-

wellen beaufschlagt, und eines Ultraschallempfängers.  
In Materials Evaluation; Nr. 47 vom August 1989, Seiten 935—943 wird ein Verfahren beschrieben, bei dem der Schweißbereich bzw. der Schweißpunkt während des gesamten Widerstandsschweißprozesses durchschallt wird. Der Widerstandsschweißprozeß besteht i. a. aus drei Phasen. Die erste Phase ist die sogenannte Vorpreßzeit. In dieser Zeit fließt kein Strom. Die Elektroden schließen sich und es wird die Elektrodenkraft von 1—3 KN aufgebaut. Danach folgt die Stromflußphase, in der die Bleche aufgeheizt werden. An die Stromflußphase schließt sich die Nachpreßzeit oder Abkühlphase an. In dieser Phase kühlt die Schweißlinse ab, erst danach öffnen sich die Schweißelektroden. Alle drei Phasen sind im Regelfall gleich lang.

Die Durchschallung erfolgt bei dem vorgenannten Verfahren mit einem longitudinalen Ultraschallgeber im Frequenzbereich von 2 MHz, der innerhalb der Schweißelektroden am Elektrodenboden angebracht ist. Die Durchschallung beginnt in der Vorpreßzeit, in der noch kein Strom fließt und dauert bis zum Ende der Nachpreßphase. Insbesondere wird dabei die Ultraschalldurchlässigkeit des Schweißpunktes in der Nachpreßphase bewertet, wobei die Abkühldauer bis zum Erreichen des Minimums der Ultraschalldurchlässigkeit bestimmt und mit dem aufgeschmolzenen Schweißlinsenvolumen korreliert wird.

Das Minimum der Ultraschalldurchlässigkeit entsteht nach der in diesem Artikel vertretenen Ansicht am Umwandlungspunkt des Eisens vom austenitischen in den ferritischen Zustand (Curiepunkt) infolge einer erhöhten Ultraschallabsorption an diesem Umwandlungspunkt.

Nachteilig an diesem Verfahren ist jedoch, daß der Schweißprozeß bereits beendet ist und die Schweißlinse abkühlt, wenn die Schweißlinsenbewertung durchgeführt wird. Der Schweißprozeß kann nicht mehr beeinflusst werden. Eine als fehlerhaft erkannte Schweißung kann allenfalls nachgeschweißt werden.

Aus der DE-AS 26 55 415 ist eine Vorrichtung zum Überwachen eines Widerstands-Punktschweißvorgangs bekannt, bei der der Schweißpunkt vom inneren Elektrodenboden aus während des Stromflusses durchschallt wird, wobei das an der gegenüberliegenden Elektrode reflektierte Ultraschallsignal empfangen und ausgewertet wird.

In dieser Druckschrift wird über die benutzte Wellenart nichts ausgesagt; der Verlauf der Ultraschalldurchlässigkeit hängt aber wesentlich von der benutzten Wellenart ab, so die Annahme, daß die Schalldurchlässigkeit des Schweißpunktes während des Schweißvorganges zunächst ein relatives Maximum erreicht, dann auf ein Minimum abfällt und im weiteren Verlauf wieder auf ein zweites Maximum ansteigt, nicht nachvollziehbar ist.

Das erste Maximum der Ultraschalldurchlässigkeit wird dadurch erklärt, daß der Temperaturanstieg in den zu verschweißenden Blechen den Ultraschallkontakt zwischen den Elektroden und dem Blech sowie zwischen den Blechen verbessert. Das darauffolgende Minimum soll davon herrühren, daß das Schweißgut aufschmilzt. Das aufgeschmolzene Eisen erhöht die Ultraschallabsorption und reduziert die Schalldurchlässigkeit. Der im weiteren Verlauf der Schweißung sich ergebende erneute Anstieg der Ultraschalldurchlässigkeit wird nicht erklärt, obwohl — wie erst erfindungsgemäß erkannt worden ist — dieser Anstieg wesentlich für die Bewertung des Schweißvorganges ist. Das Bewertungsverfahren ermittelt den Betrag des erneuten Anstieges der Ultraschalldurchlässigkeit. Aus dieser Meßgröße wird die Größe der Schweißlinse bestimmt. Die physikalische Erklärung für dieses Verfahrensprinzip ist in sich widersprüchlich. Das Verfahren beruht auf der Messung der Differenz zweier Ultraschalldurchlässigkeitswerte.

Das in Materials Evaluation; Nr. 15 vom Oktober 1967, Seiten 226—230 vorgeschlagene Verfahren arbeitet ebenfalls mit Ultraschallsensoren, die hochfrequente longitudinale Ultraschallsignale im Frequenzbereich von 2 MHz erzeugen, mit denen die Durchschallung der Schweißpunkte durchgeführt wird.

Nach Ansicht der Autoren ist jedoch mit einer Durchschallung des Schweißpunktes dessen Bewertung nicht möglich, zumindest nicht in der Abkühlphase. Die Autoren dieses Artikels begründen dies mit einer Spaltbildung zwischen den Schweißelektroden und den zu verschweißenden Blechen. Bei der Erstarrung der Schweißlinse schrumpft das Material, wodurch sich zwischen Elektrode und Blech ein Spalt bildet, der die Ultraschalldurchlässigkeit vermindert.

Weiterhin kann aus dem Verlauf der Ultraschalldurchlässigkeit vor, während und nach der Schweißung, lediglich auf das Maß der Wärmeeinbringung in den Schweißpunkt geschlossen werden.

Bei dem vorgeschlagenen Verfahren wird deshalb der Verlauf der Ultraschalldurchlässigkeit des gesamten Schweißvorganges von der Vorpreßzeit bis einschließlich der Abkühlphase mit einem vorgegebenen Musterverlauf verglichen. Das Verfahren analysiert jedoch nicht das Verhalten der Ultraschalldurchlässigkeit während der Stromflußphase.

In Materialprüfung 32 (1990) 10; Seiten 311—312 werden Untersuchungsergebnisse zur Ultraschallprüfung von Punktschweißungen vorgestellt:

Bei diesen Untersuchungen wird die Schalldurchlässigkeit in der Vorpreßzeit vor Beginn des Stromflusses verglichen mit der Ultraschalldurchlässigkeit in der Nachpreßzeit nach Beendigung des Stromflusses.

Das Absinken der Ultraschalldurchlässigkeit der Schweißlinse in der Abkühlphase gegenüber der höheren Ultraschalldurchlässigkeit vor der Schweißung wird mit einer Spaltbildung zwischen Elektrode und Blech erklärt. Dabei wird die Ansicht vertreten, daß es wegen der Spaltbildung zwischen Schweißelektroden und den zu verschweißenden Blechen prinzipiell unmöglich ist, mit einer Durchschallung der Schweißpunkte Klebeschweißungen zu erkennen.

Das hier beschriebene technische Handeln beschränkt sich also auf einen Vergleich der Ultraschalldurchlässigkeit des Schweißpunktes vor und nach der Stromflußphase. Die Ultraschalldurchlässigkeit während der Stromflußphase wird nicht analysiert.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Bewertung von Schweißvorgängen und insbesondere von Widerstandsschweißungen, unter Verwendung einer Ultraschallquelle, die den Schweißbereich mit Ultraschallwellen beaufschlagt, und eines Ultraschallempfängers, anzugeben, das eine on-line-Bewertung der Schweißung erlaubt und das insbesondere während des Zeitraumes, während dem ein aufgeschmolzener Bereich existiert, Aussagen über den Schweißvorgang liefert.

Eine erfindungsgemäße Lösung dieser Aufgabe ist in Anspruch 1 angegeben.

Die Erfindung geht von dem Grundgedanken aus, die Temperaturabhängigkeit der Ultraschalldurchlässigkeit der Schweißlinse bzw. des Schweißpunktes in der Stromflußphase für die Schweißpunktbewertung zu nutzen, wobei insbesondere die Schallschwächung von Scherwellen, also beispielsweise transversaler Ultraschallwellen oder Torsionswellen beim Durchgang durch flüssige Medien genutzt wird. Erfindungsgemäß wird deshalb aus dem Ausgangssignal des Ultraschallempfängers der Zeitpunkt  $t_s$  ermittelt, an dem die Schmelztemperatur  $T_s$  des Schweißgutes erreicht wird, und sich eine Schweißlinse zu bilden beginnt. Anschließend wird aus der Schwächung der Scherwellen nach dem Erreichen der Aufschmelztemperatur während des Schweißvorganges das Schweißlinsenvolumen  $V$  berechnet.

Bei allen aus dem Stand der Technik bekannten Vorschlägen, ausgenommen die in der DE-AS 26 55 415 beschriebene Vorrichtung, wird nicht die Ultraschalldurchlässigkeit des Schweißpunktes während der Stromflußphase analysiert.

Die Bewertung der Ultraschalldurchlässigkeit des Schweißpunktes während der Stromflußphase beschränkt sich jedoch in der DE-AS 26 55 415 auf die Bestimmung der Differenz zweier Amplitudenwerte: der Differenz zwischen der Ultraschalldurchlässigkeit am Ende der Stromflußphase und dem Minimalwert der Ultraschalldurchlässigkeit während der Stromflußphase. Eine physikalische Erklärung für diese Vorgehensweise wird nicht gegeben. Das Bewertungsverfahren selbst steht darüber hinaus im Widerspruch zu den Erkenntnissen der vorliegenden Erfindung über die Temperaturabhängigkeit der Ultraschalldurchlässigkeit der Schweißpunkte für Transversal- bzw. Torsionswellen.

Wesentliche Gründe für die Temperaturabhängigkeit der Ultraschalldurchlässigkeit der Schweißpunkte sind nämlich bisher nicht erkannt worden. Dies wird im folgenden näher erläutert:

In den eingangs genannten Druckschriften werden unterschiedliche Ursachen für die Veränderung der Ultraschalldurchlässigkeit während der einzelnen Phasen des Schweißprozesses genannt. Beispielsweise wird eine erhöhte Schallschwächung bei der Curietemperatur oder am Schmelzpunkt angenommen. Des weiteren wird eine Spaltbildung zwischen den Schweißelektroden und den Blechen für die Ultraschallschwächung in der Abkühlphase verantwortlich gemacht.

Im Gegensatz dazu geht die Erfindung davon aus, daß die Durchschallung des Schweißpunktes — beispielsweise von den Schweißelektroden aus — modellmäßig als Ultraschalldurchgang durch eine planparallele Platte beschrieben werden kann, wobei die Elektroden die Rolle des schallein- bzw. ableitenden Mediums spielen, und das Schweißgut die Rolle der durchschallten Platte. Diese Modellvorstellung gilt entsprechend auch für andere Schweißverfahren, wie beispielsweise Laserschweißungen, bei denen die Erfindung ebenfalls anwendbar ist.

Erfindungsgemäß wird nun die Tatsache genutzt, daß Scherwellen, wie Transversal- oder Torsionswellen in Flüssigkeiten nicht bzw. schlecht ausbreitungsfähig sind. Die Ultraschallschwächung dieser Wellen wird nach Erreichen der Schmelztemperatur durch die Größe des aufschmelzenden Schweißlinsenvolumens bestimmt. Aus dem Wert der Ultraschallschwächung nach Erreichen der Schmelztemperatur im Schweißpunkt wird direkt die Größe des Schweißlinsendurchmessers ermittelt.

Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Nach Anspruch 2 kann das momentane Schweißlinsenvolumen  $V$  zum Zeitpunkt  $t > t_s$  über folgende Beziehung bestimmt werden:

$$V = B' \cdot (D(t) - D(t_s)) + C' \quad (12)$$

hierbei bedeuten:

$B', C'$  experimentell bestimmte Konstanten

$D(t)$  Ultraschalldurchlässigkeit zum Zeitpunkt  $t$

$D(t_s)$  Ultraschalldurchlässigkeit beim Erreichen der Schmelztemperatur.

Alternativ oder zusätzlich ist es möglich, das am Ende der Schweißung erreichte Schweißlinsenvolumen  $V$  aus dem Zeitraum  $\Delta t$  vom Aufschmelzzeitpunkt bis zum Ende der Schweißung über folgende Beziehung zu bestimmen:

$$V = B'' \cdot \Delta t + C'', \quad (13)$$

hierbei sind  $B''$  und  $C''$  ebenfalls experimentell zu ermittelnde Konstanten.

Im Anspruch 4 ist angegeben, daß das in einem Zeitraum  $\Delta t$  vom Erreichen der Schmelztemperatur bis zum Ende der Schweißung erreichbare Schweißlinsenvolumen über folgende Beziehung ermittelt werden kann:

$$V = B''' \cdot (\Delta t + D(t_s) / ([D(t_s + \delta t) - D(t_s)] / \delta t)) + C''' \quad (14)$$

Weiterhin ist es gemäß Anspruch 9 möglich, zur Bestimmung der Schalldurchlässigkeit  $D(t)$  des Schweißbereichs während jeder Stromhalbwellen des Schweißstromes aus dem Ausgangssignal  $A(t)$  des Ultraschallempfängers innerhalb eines ersten Zeitfensters  $i$ , das gegenüber dem Ultraschall-Sendesignal, dessen Sendepiegel konstant gehalten wird, um eine definierte Verzögerungszeit verzögert ist, die mittlere Ultraschallenergie  $E_{ii}$  gemäß der folgenden Gleichung zu ermitteln:

$$E_{1i} = 1/\Delta t_1 \int_{\Delta t_1}^{\Delta t_1} A(t)^2 dt \quad (15)$$

Innerhalb eines zweiten, vor oder nach dem ersten Zeitfenster liegenden Zeitfensters, während dem keine Beaufschlagung des Schweißgutes mit Ultraschallwellen erfolgt, kann die durch den Schweißvorgang entstehende mittlere Schallemissionsenergie  $E_{2j}$  gemäß der folgenden Gleichung ermittelt werden

$$E_{2j} = 1/\Delta t_2 \int_{\Delta t_2}^{\Delta t_2} A(t)^2 dt \quad (16)$$

Eine Alternative hierzu ist im Anspruch 10 angegeben.

Gemäß der dort angegebenen Vorgehensweise wird zur Bestimmung der Schalldurchlässigkeit  $D(t)$  des Schweißbereichs während jeder Stromhalbwellen des Schweißstromes aus dem Ausgangssignal  $A(t)$  des Ultraschallempfängers innerhalb eines ersten Zeitfensters  $i$ , das gegenüber dem Ultraschall-Sendesignal, dessen Sendepiegel konstant gehalten wird, um eine definierte Verzögerungszeit verzögert ist, die Ultraschallgröße  $E_{1i}$  aus dem maximalen innerhalb dieses Zeitfensters auftretenden Ausgangssignals  $A(t)$  ermittelt. Innerhalb eines zweiten, vor oder nach dem ersten Zeitfenster liegenden Zeitfensters, während dem keine Beaufschlagung des Schweißgutes mit Ultraschallwellen erfolgt, wird die durch den Schweißvorgang entstehende Schallemissionsgröße  $E_{2j}$  aus dem maximalen innerhalb des zweiten Zeitfensters auftretenden Ausgangssignal  $A(t)$  ermittelt.

Die in den Ansprüchen 9 oder 10 angegebenen Verfahrensschritte erlauben es, daß bestimmte Meßwerte für die Ultraschalldurchlässigkeit  $D$  korrigiert werden, wenn der laufend bestimmte Schallemissionspegel  $E_{2j}$  einen vorgegebenen Schwellenwert überschreitet. Die Korrektur kann dadurch erfolgen, daß der gestörte Schalldurchlässigkeitswert  $E_{1i}$  durch den Mittelwert der beiden Nachbarwerte ersetzt wird (Anspruch 12).

Die Erfindung wird nachstehend anhand eines Ausführungsbeispiels näher erläutert:

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird aus den während der Schweißung gemessenen Werten für die Schalldurchlässigkeit  $D(t)$  die Schallgeschwindigkeit  $c_2(t)$  im Schweißpunkt ermittelt.

Für Widerstandsschweißungen von Blechen können die im folgenden angegebenen Näherungsformeln verwendet werden, die für den Anwendungsfall "Schalldurchgang durch eine planparallele Platte" gelten. Bei anderen Konfigurationen und/oder Schweißverfahren sind die Näherungsformeln entsprechend dem jeweiligen Anwendungsfall abzuwandeln:

$$D(t) = 1/(1 + 1/4 \cdot (m(t) - 1/m(t))^2 \cdot \sin^2(2 \cdot \pi \cdot d/\lambda)) \quad (3)$$

wobei

$$m(t) = Z_1/Z_2 \quad (2)$$

und

$$\begin{aligned} Z_1 &= \sigma_1 \cdot c_1(t) \\ Z_2 &= \sigma_2 \cdot c_2(t) \end{aligned} \quad (1)$$

In den Gl. (1)–(3) bedeuten:

$Z_1$  = Schallwellenwiderstand der Elektroden,  
 $Z_2$  = Schallwellenwiderstand der Schweißlinse,  
 $m$  = Verhältnis der Schallwellenwiderstände  $Z_1/Z_2$ ,  
 $D$  = Ultraschalldurchlässigkeitsfaktor,  
 $\sigma_1$  = Dichte der Schweißelektroden,  
 $\sigma_2$  = Dichte des Schweißgutes,  
 $c_1$  = Schallgeschwindigkeit des Elektrodenmaterials,  
 $c_2$  = Schallgeschwindigkeit des Schweißgutes,  
 $d$  = Dicke der Schweißlinse,  
 $\lambda$  = Ultraschallwellenlänge.

Aus Gleichung (3) erkennt man, daß der Durchlässigkeitsfaktor  $D$  vom Verhältnis im der Schallwellenwiderstände der Elektrode  $Z_1$ , und dem Schallwellenwiderstand  $Z_2$  des Schweißgutes, abhängt. Die Schallwellenwiderstände der Schweißelektrode  $Z_1$  und des Schweißgutes  $Z_2$  ergeben sich nach Gleichung (1) näherungsweise aus dem Produkt von Dichte  $\sigma$  und Schallgeschwindigkeit  $c$  in dem jeweiligen Medium.

Die Erfindung geht nun davon aus, daß die Änderung der Ultraschalldurchlässigkeit des Schweißpunktes durch die temperaturbedingte Änderung der Schallgeschwindigkeit  $c_2$  im Schweißpunkt verursacht wird und zwar dadurch, daß bei einer Änderung der Schallgeschwindigkeit  $c_2$  im Schweißpunkt, sich nach Gleichung (1) der Schallwellenwiderstand  $Z_2$  des Schweißpunktes verändert, während der Schallwellenwiderstand der Elektroden  $Z_1$  konstant bleibt. Damit ändert sich das Verhältnis der Schallwellenwiderstände  $m$  und entsprechend

Gleichung (3) der Durchlässigkeitsfaktor D. Der Term mit  $\sin^2(2 \cdot \pi \cdot d / \lambda)$  soll im folgenden als Konstante betrachtet und zunächst unberücksichtigt bleiben.

Nimmt man an, daß die Schweißelektroden aus Kupfer sind und die zu verschweißenden Bleche aus Eisen, dann ist zu Beginn der Stromflußphase (bei Raumtemperatur) der Schallwellenwiderstand in Kupfer ( $Z_1 = 20,1$ ) kleiner als der Schallwellenwiderstand in Eisen ( $Z_2 = 25,3$ ). Der Durchlässigkeitsfaktor D ist damit zu Beginn der Schweißung nach Gleichung (3):  $D < 1$ .

Beim Schweißen sinkt infolge der Temperaturerhöhung die Schallgeschwindigkeit im Eisen und damit auch der Schallwellenwiderstand  $Z_2$ . Die Schalldurchlässigkeit D erreicht nach Gleichung (3) temperaturbedingt zunächst ein Maximum, nämlich zu dem Zeitpunkt t, bei dem der Schallwellenwiderstand des Eisens  $Z_2$  den Wert des Schallwellenwiderstandes der Schweißelektroden  $Z_1$  annimmt; in diesem Fall ist  $m = 1$  und nach Gleichung (3) ist dann die Durchlässigkeit D des Schweißpunktes maximal d. h.  $D = 1$ .

Bei einer weiteren Temperaturerhöhung nimmt der Schallwellenwiderstand des Eisens weiter ab, und damit wird auch der Durchlässigkeitsfaktor D wieder kleiner. Die Schalldurchlässigkeit des Schweißpunktes wird bis zum Erreichen der Schmelztemperatur durch Gleichung (3) bestimmt. Nach Erreichen der Schmelztemperatur wird die Schalldurchlässigkeit weiter vermindert, jetzt jedoch durch die starke Schallschwächung von Scherwellen in flüssigen Medien. Der Schwächungsgrad der Transversalwellen nach Erreichen der Schmelztemperatur  $T_s$  hängt direkt von der Größe des aufgeschmolzenen Volumens ab.

Ein erneuter Anstieg der Ultraschalldurchlässigkeit ist deshalb im Gegensatz zu Aussagen des Standes der Technik (DE-AS 26 55 415) kein Zeichen für eine gute Schweißung, sondern läßt auf Störungen im Schweißprozeß schließen. Vor allem aber beziehen sich die Aussagen im Stand der Technik nicht auf Scherwellen.

Beim Punktschweißprozeß kommt es vor, daß das aufgeschmolzene Schweißgut z. B. durch Spritzerbildung oder zu geringem Elektrodendruck während der Schweißung aus der Schweißlinse herausgedrückt wird. In diesem Fall geht der Schweißlinse flüssiges Schweißgut verloren, samt der darin gespeicherten Wärmeenergie. Dieser Effekt macht sich durch einen Wiederanstieg des Durchlässigkeitsfaktors D bemerkbar.

Ausgehend von dem Zusammenhang zwischen der Ultraschalldurchlässigkeit D und dem Schallwellenwiderstand  $Z_2$  im Schweißpunkt, läßt sich aus Gleichung (3) der in Gleichung (4) dargestellte Zusammenhang zwischen der Schallgeschwindigkeit  $c_2$  im Schweißpunkt und dem Durchlässigkeitsfaktor D des Schweißpunktes ableiten.

$$c_2(t) = \sigma_1 \cdot c_1 / \sigma_2 \cdot 1 / \sqrt{(1 + \sigma_1 \cdot c_1 / \sigma_2) / ((1/D(t) - 1) / \pi \cdot d \cdot f)} \quad (4)$$

In Gleichung (4) bedeutet f die Ultraschallfrequenz.

Damit kann dem Durchlässigkeitsfaktor D(t) mit Hilfe von Gleichung (4) die Schallgeschwindigkeit im Schweißgut  $c_2(t)$  zugeordnet werden. Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht es damit, den Temperaturverlauf im Schweißpunkt T(t) als Funktion der Schweißdauer zu ermitteln. Dabei wird die Schallgeschwindigkeit  $c_2(t)$  im Schweißpunkt mit einer vorgegebenen Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit  $c_2(T)$  verglichen.

Dies geschieht dadurch, daß die ermittelte Schallgeschwindigkeit  $c_2(t)$  mit einer vorgegebenen Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit im Schweißgut,  $c_2(T)$ , verglichen wird. Dazu wird in diesem Ausführungsbeispiel für die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit im Schweißgut beispielhaft die folgende angenommene lineare Beziehung benutzt.

$$T(t) = (c_{20} - c_2(t)) \cdot T_s / c_2 \quad (4')$$

In dieser Gleichung bedeutet  $c_{20}$  die Schallgeschwindigkeit im Schweißgut bei Raumtemperatur,  $T_s$  die Schmelztemperatur des Schweißgutes und  $c_2$  die Differenz der Schallgeschwindigkeiten zwischen Raumtemperatur und Schmelztemperatur.

Diese Beziehung kann durch eine für den jeweiligen Anwendungsfall experimentell oder theoretisch ermittelte Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit ersetzt werden.

Im weiteren wird aus dem ermittelten Temperaturverlauf T(t) im Schweißpunkt durch Vergleich mit der Schmelztemperatur des Eisens  $T_s$ , der Aufschmelzzeitpunkt  $t_s$  des Schweißgutes bestimmt. Der ermittelte Aufschmelzzeitpunkt  $t_s$  kennzeichnet den Beginn der Schweißlinnenbildung.

Der ermittelte Aufschmelzpunkt  $t_s$  kennzeichnet dabei den Beginn der Schweißlinnenbildung, wobei die ab diesem Zeitpunkt zugeführte Energie zur Schweißlinnenbildung dient.

Für den zeitlichen Temperaturverlauf T(t) im Schweißgut kann ein funktionaler Zusammenhang nach Gleichung (5) angenommen werden.

$$T(t) = A \cdot (1 - \exp(-B \cdot t)) \quad (5)$$

Dabei gelten für die Konstanten A und B die Beziehungen

$$A = J^2 \cdot R_o \cdot d / k \quad (6)$$

$$B = k / (c_v \cdot \sigma \cdot d) \quad (7)$$

In Gleichung (6) und (7) bedeuten J die Stromdichte durch den Schweißpunkt,  $R_o$  der spezifische elektrische Widerstand des Schweißgutes, d die Blechdicke,

k die Wärmeleitzahl des Systems Blech/Elektrode,  
 $\sigma$  die Dichte des Schweißgutes,  
 $c_v$  die spez. Wärme des Schweißgutes.

Aus den Gleichungen (6) und (7) ergibt sich für die Stromdichte folgender Zusammenhang:

$$J^2 = A \cdot B \cdot c_v \cdot \sigma / d \quad (8)$$

Daraus leitet sich ab, daß die Stromdichte durch den Schweißpunkt direkt proportional dem Produkt der Konstanten A und B ist. Die Proportionalitätskonstanten sind bekannte Materialkonstanten.

Zur Ermittlung der absoluten Schweißlinsengröße kann bei Messung der Stromstärke I der Elektrodendurchmesser  $\varnothing_e$  nach Gleichung (9)

$$\varnothing_e^2 = I^2 \cdot R_o / (A \cdot B \cdot c_v \cdot \sigma) \quad (9)$$

bestimmt werden. In Gleichung (9) bedeutet  
 I den Effektivwert der Stromstärke,  
 A, B die Konstanten aus Gleichung 5,  
 $R_o$  der spez. elektrische Widerstand des Schweißgutes,  
 $c_v$  die spez. Wärme des Schweißgutes,  
 $\sigma$  die Dichte des Schweißgutes.

Durch Verwendung einer vorgegebenen Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit, z. B. nach Gleichung (4') kann nach Gleichung (4) jedem Durchlässigkeitswert D ein Temperaturwert in der Schweißlinse zugeordnet werden. Ist ein erstes Minimum in der Schalldurchlässigkeit des Schweißpunktes erreicht worden, bedeutet ein erneuter Anstieg der Ultraschalldurchlässigkeit einen Abfall der Temperatur im Schweißpunkt. Unterschreitet die Temperatur im Schweißpunkt während der Stromflußphase einen vorgegebenen Schwellenwert z. B. die Schmelztemperatur, ist dies ein Hinweis auf eine Störung des Schweißprozesses und wird angezeigt.

Die Anzeige erfolgt dann, wenn ein zweites relatives Maximum der Ultraschalldurchlässigkeit erreicht wird und dieses Durchlässigkeitsmaximum einen vorgegebenen Höchstwert überschreitet.

Des weiteren kann kontinuierlich die Korrektur des Schweißlinsendurchmessers erfolgen. Wird eine Störung in der Weise angezeigt, daß die Temperatur der Schweißlinse für eine Zeitdauer  $t_3$  die Schmelztemperatur unterschreitet, dann muß das durchgeführte Verfahren zur Ermittlung des Schweißlinsendurchmessers derart modifiziert werden, daß bei der Berechnung des Schweißlinsendurchmessers nach Gleichung (13) die Zeitdauer  $t_3$ , während der die Temperatur der Schweißlinse unterhalb der Schmelztemperatur bleibt, von der Gesamtschweißdauer t abgezogen wird.

Für die Ermittlung des Schweißlinsendurchmessers wird desweiteren die starke Ultraschallschwächung von Scherwellen, wie Transversal- bzw. Torsionswellen in flüssigen Medien genutzt. Während sich Longitudinalwellen in idealen Flüssigkeiten gut ausbreiten können, sind diese für Transversal- bzw. Torsionswellen undurchlässig.

Der Wert der Ultraschallschwächung von Transversal- bzw. Torsionswellen hängt nach Erreichen der Schmelztemperatur von der Größe des aufgeschmolzenen Schweißlinsenvolumens ab. Eine maximale Schwächung wird erreicht, wenn der aufgeschmolzene Schweißlinsendurchmesser die Größe des gesamten durchschallten Bereichs, d. h. die Größe des Elektrodendurchmessers erreicht.

Der Schweißlinsendurchmesser kann damit direkt während der Schweißung aus dem Betrag der Ultraschalldurchlässigkeit nach Erreichen der Schmelztemperatur ermittelt werden.

In der Praxis ist es vorteilhaft, den zeitlichen Verlauf der Ultraschalldurchlässigkeit D(t) auf den Maximalwert zu normieren. D.h. man dividiert die Durchlässigkeitswerte durch den Maximalwert. Das Maximum der Ultraschalldurchlässigkeit hat dann den Wert 1.

Der Minimalwert der normierten Ultraschalldurchlässigkeit  $D_{\min}$  ist dann direkt mit dem Schweißlinsendurchmesser  $\varnothing$  korreliert. Es besteht entsprechend Gleichung (11) folgende Beziehung:

$$\varnothing = \varnothing_e \cdot (D_1 - D_{\min}) / (D_1 - D_2) \quad (10)$$

$D_1$  Schalldurchlässigkeit am Schmelzpunkt,

$D_2$  Schalldurchlässigkeit bei maximaler Schweißlinsengröße

$\varnothing_e$  Elektrodendurchmesser.

$D_1$  und  $D_2$  müssen durch Probeschweißungen ermittelt werden.

Die Schweißlinsengrößenbestimmung kann gegenüber Störeinflüssen verbessert werden, indem auch die zeitliche Ableitung der normierten Ultraschalldurchlässigkeit ( $D'(t)$ ) ausgewertet wird.

Hierzu wird vom Beginn der Schweißung an jeweils die Differenz der Ultraschalldurchlässigkeiten von zwei benachbarten Durchschallungszeitpunkten bestimmt. Diese Differenzwerte entsprechen näherungsweise der zeitlichen Ableitung der Ultraschalldurchlässigkeit  $D'(t)$ . Ist die Differenz (2. Wert - 1. Wert) erstmals negativ, dann ist das Maximum der Ultraschalldurchlässigkeit überschritten. Unterschreitet im folgenden die normierte Ultraschalldurchlässigkeit einen vorgegebenen Wert (Aufschmelzzeitpunkt), dann werden ab diesem Zeitpunkt die negativen Differenzwerte aufsummiert. Die Summenbildung wird fortgeführt, solange die Differenzwerte negativ sind und ihr Betrag größer ist als ein vorgegebener Wert. Anschließend wird der Mittelwert  $D'_m$  der aufsummierten Werte gebildet. Aus  $D'_m$  und aus dem Zeitpunkt für das Minimum der Ableitung  $t_{\min}$  wird während der Schweißung nach Gleichung (14) bzw. (11) der Schweißlinsendurchmesser  $\varnothing$  errechnet.

$$\emptyset = \emptyset_e \cdot (-K_1 \cdot (D(t_{\min})/D'_{m-t_{\min}}) + K_2) \quad (11)$$

$K_1, K_2$  Konstanten, die durch Probeschweißungen ermittelt werden müssen,

$D(t_{\min})$  ist der Wert der normierten Ultraschalldurchlässigkeit zum Zeitpunkt des Minimums der Ableitung.

Aus den bisherigen Ausführungen geht hervor, daß der Verlauf der Ultraschalldurchlässigkeitsfaktoren in einem Schweißpunkt als Funktion der Schweißdauer durch den Temperaturverlauf im Schweißpunkt bestimmt wird. Dies gilt bis zum Erreichen der Schmelztemperatur im Schweißgut. Danach wird der Ultraschalldurchlässigkeitsfaktor durch die Größe des aufgeschmolzenen Schweißlinsenvolumens bestimmt. Bei bekannten Materialien von Schweißelektroden und Schweißgut und bei bekannter Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeiten kann damit für jede Schweißstromstärke ein Musterverlauf des Ultraschalldurchlässigkeitsfaktors als Funktion der Schweißdauer vorherberechnet oder im Rahmen von Probeschweißungen experimentell aufgezeichnet werden.

Durch diesen Musterverlauf ist der Temperaturverlauf im Schweißpunkt und die Schweißlinsengröße festgelegt. Beispielsweise müssen das Maximum der Durchlässigkeit und die Schmelztemperatur nach vorgegebenen Zeiten erreicht werden.

In der Praxis ist neben einer Bewertung der Schweißpunkte eine Regelung des Schweißprozesses erwünscht, um schlechte Schweißungen zu vermeiden. Die Regelung des Schweißprozesses kann in der Weise erfolgen, daß der Verlauf der Ultraschalldurchlässigkeit mit einem vorgegebenen Musterverlauf (Sollwert) verglichen wird. Bei Abweichungen von diesem Musterverlauf werden die Schweißparameter, z. B. die Stromstärke entsprechend verändert, bis die nachfolgenden Durchlässigkeitswerte wieder mit dem Musterverlauf übereinstimmen.

Die Messung der Schallemission in einem zweiten Meßfenster, das z. B. jeweils direkt vor den Einschallzeitpunkten liegt, hat den Zweck Störungen bei der Bestimmung der Ultraschalldurchlässigkeitswerte, z. B. durch Spritzerbildung, zu erkennen. Werden in einem der zweiten Meßfenster Störsignale festgestellt, dann wird der nachfolgende Meßwert entsprechend dem Störeinfluß korrigiert oder durch den Mittelwert der Meßwerte vor und nach der Störung ersetzt.

Die Auswahl und die Anordnung des oder der Ultraschallsender und des oder der Ultraschallempfänger erfolgt entsprechend dem jeweiligen Anwendungsfall. Gegebenenfalls kann auch ein und derselbe Sensor als Ultraschallsender und -empfänger verwendet werden.

Darüber hinaus ist es auch möglich, Ultraschallwellen mit Laserstrahlen anzuregen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur on-line-Bewertung von Schweißvorgängen und insbesondere von Widerstandsschweißungen, unter Verwendung einer Ultraschallquelle, die den Schweißbereich mit Scherwellen beaufschlagt, und eines Ultraschallempfängers, mit folgenden Schritten:

- aus dem Ausgangssignal des Ultraschallempfängers wird der Zeitpunkt  $t_s$  ermittelt, an dem die Schmelztemperatur  $T_s$  des Schweißgutes erreicht wird, und sich eine Schweißlinse zu bilden beginnt,
- aus der Schwächung der Scherwellen nach dem Erreichen der Aufschmelztemperatur wird während des Schweißvorganges das Schweißlinsenvolumen  $V$  berechnet.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das momentane Schweißlinsenvolumen  $V$  zum Zeitpunkt  $t > t_s$  über folgende Beziehung bestimmt wird:

$$V = B' \cdot (D(t) - D(t_s)) + C'$$

hierbei bedeuten:

$B', C'$  experimentell bestimmte Konstanten

$D(t)$  Ultraschalldurchlässigkeit zum Zeitpunkt  $t$

$D(t_s)$  Ultraschalldurchlässigkeit beim Erreichen der Schmelztemperatur.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das am Ende der Schweißung erreichte Schweißlinsenvolumen  $V$  aus dem Zeitraum  $\Delta t$  vom Aufschmelzzeitpunkt bis zum Ende der Schweißung über folgende Beziehung bestimmt wird:

$$V = B'' \cdot \Delta t + C'',$$

hierbei sind  $B''$  und  $C''$  experimentell zu ermittelnde Konstanten.

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das in einem Zeitraum  $\Delta t$  vom Erreichen der Schmelztemperatur bis zum Ende der Schweißung erreichbare Schweißlinsenvolumen über folgende Beziehung ermittelt wird:

$$V = B''' \cdot (\Delta t + D(t_s)/([D(t_s + \delta t) - D(t_s)]/\delta t)) + C'''.$$

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Zeitpunkt, an dem die Schmelztemperatur  $T_s$  erreicht wird, dadurch ermittelt wird, daß der Zeitpunkt bestimmt wird, an dem sich die zeitliche Änderung der Schwächung der Scherwellen von einem vergleichsweise kleinen auf einen vergleichsweise großen Wert ändert.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

- die Schallgeschwindigkeit  $c_2$  der Scherwellen im Schweißbereich wird als Funktion der Zeit  $t$  ermittelt,



- aus der ermittelten Schallgeschwindigkeit  $c_2(t)$  im Schweißbereich wird die Temperatur  $T(t)$  des Schweißbereichs durch Vergleich mit einer vorher bestimmten Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit  $c_2(t)$  im Schweißgut als Funktion der Schweißdauer ermittelt,
- aus dem Temperaturverlauf  $T(t)$  im Schweißbereich wird durch Vergleich mit der Schmelztemperatur des Schweißguts  $T_s$  der Aufschmelzzeitpunkt  $t_s$  des Schweißgutes bestimmt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß während des Schweißvorganges die Ultraschalldurchlässigkeit  $D(t)$  (Ultraschalldurchlässigkeitsfaktor) als Funktion der Zeit gemessen und hieraus die momentane Schallgeschwindigkeit  $c_2(t)$  im Schweißpunkt ermittelt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Ultraschallgeschwindigkeit  $c_2(t)$  aus der Ultraschalldurchlässigkeit  $D(t)$  mittels folgender Gleichung berechnet wird:

$$c_2(t) = (\sigma_1 \cdot c_1 / \sigma_2) \cdot 1 / \sqrt{(1 + (\sigma_1 \cdot c_1 / \sigma_2) / (1/D(t) - 1) / \pi \cdot d \cdot f)}$$

wobei bedeuten:

$\sigma_1$  Dichte der Schweißelektroden bzw. der Ultraschallquelle

$\sigma_2$  Dichte des Schweißgutes,

$c_1$  Schallgeschwindigkeit des Elektroden- bzw. Quellenmaterials,

$c_2$  Schallgeschwindigkeit des Schweißgutes,

$d$  Dicke der Schweißlinse,

$f$  Ultraschallfrequenz.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der Schalldurchlässigkeit  $D(t)$  des Schweißbereichs während jeder Stromhalbwelle des Schweißstromes aus dem Ausgangssignal  $A(t)$  des Ultraschallempfängers

- innerhalb eines ersten Zeitfensters  $i$ , das gegenüber dem Ultraschall-Sendesignal, dessen Sendepiegel konstant gehalten wird, um eine definierte Verzögerungszeit verzögert ist, die mittlere Ultraschallenergie  $E_{1i}$  gemäß der folgenden Gleichung ermittelt wird,

$$E_{1i} = 1/\Delta t_1 \int_0^{\Delta t_1} A(t)^2 dt$$

- und innerhalb eines zweiten, vor oder nach dem ersten Zeitfenster liegenden Zeitfensters, während dem keine Beaufschlagung des Schweißgutes mit Ultraschallwellen erfolgt, die durch den Schweißvorgang entstehende mittlere Schallemissionsenergie  $E_{2j}$  gemäß der folgenden Gleichung ermittelt wird

$$E_{2j} = 1/\Delta t_2 \int_0^{\Delta t_2} A(t)^2 dt$$

10. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der Schalldurchlässigkeit  $D(t)$  des Schweißbereichs während jeder Stromhalbwelle des Schweißstromes aus dem Ausgangssignal  $A(t)$  des Ultraschallempfängers

- innerhalb eines ersten Zeitfensters  $i$ , das gegenüber dem Ultraschall-Sendesignal, dessen Sendepiegel konstant gehalten wird, um eine definierte Verzögerungszeit verzögert ist, die Ultraschallgröße  $E_{1i}$  aus dem maximalen innerhalb dieses Zeitfensters auftretenden Ausgangssignals  $A(t)$  ermittelt wird,
- und innerhalb eines zweiten, vor oder nach dem ersten Zeitfenster liegenden Zeitfensters, während dem keine Beaufschlagung des Schweißgutes mit Ultraschallwellen erfolgt, die durch den Schweißvorgang entstehende Schallemissionsgröße  $E_{2j}$  aus dem maximalen innerhalb des zweiten Zeitfensters auftretenden Ausgangssignal  $A(t)$  ermittelt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß bestimmte Meßwerte für die Ultraschalldurchlässigkeit  $D$  korrigiert werden, wenn der laufend bestimmte Schallemissionspegel  $E_{2j}$  einen vorgegebenen Schwellenwert überschreitet.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Korrektur dadurch erfolgt, daß der gestörte Schalldurchlässigkeitswert  $E_{1i}$  durch den Mittelwert der beiden Nachbarwerte ersetzt wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Scherwellen transversale Ultraschallwellen oder Torsionsschallwellen sind.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Stromstärke gemessen und aus der gemessenen Stromstärke der momentane Elektrodendurchmesser  $E$  ermittelt wird.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß für den zeitlichen Temperaturverlauf  $T(t)$  bis zum Erreichen der Schmelztemperatur im Schweißgut angenommen wird



$$T(t) = A \cdot (1 - \exp(-(B \cdot t)))$$

wobei für die Konstanten A und B die Beziehungen gelten:

$$A = J^2 \cdot R_o \cdot d / k$$

$$B = k / (c_v \cdot \sigma \cdot d)$$

5

es bedeuten

J die Stromdichte durch den Schweißpunkt,

$R_o$  der spezifische elektrische Widerstand des Schweißgutes,

d die Blechdicke,

10

k die Wärmeleitzahl des Systems Blech/Elektrode,

$\sigma$  die Dichte des Schweißgutes,

$c_v$  die spez. Wärme des Schweißgutes.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß während der Schweißung durch Änderung der Stromstärke I oder der Schweißdauer t das Schweißergebnis beeinflusst wird.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

**PUB-NO:** DE004325878A1  
**DOCUMENT-IDENTIFIER:** DE 4325878 A1  
**TITLE:** Method for assessment of  
welded joints using  
ultrasound  
**PUBN-DATE:** February 24, 1994

**INVENTOR-INFORMATION:**

<b>NAME</b>	<b>COUNTRY</b>
WASCHKIES, ECKHARD DR	DE

**ASSIGNEE-INFORMATION:**

<b>NAME</b>	<b>COUNTRY</b>
FRAUNHOFER GES FORSCHUNG	DE

**APPL-NO:** DE04325878  
**APPL-DATE:** August 2, 1993

**PRIORITY-DATA:** DE04325878A (August 2, 1993) ,  
DE04225251A (July 31, 1992)

**INT-CL (IPC):** G01N029/04 , G01N029/18 ,  
B23K011/12 , G01D003/02 ,  
G01B017/00 , G01D003/04

**EUR-CL (EPC):** B23K011/25 , G01N029/07 ,  
G01N029/11 , G01N029/32

**ABSTRACT:**

CHG DATE=19990617 STATUS=O>Assessment of resistance welded joints with the use of an ultrasound sender and a receiver comprises (a) the velocity variation  $c_2(t)$  of ultrasound with time  $t$  in the welding region is determined during the welding process; (b) the temperature variation  $T(t)$  of the welding region is determined by comparing  $c_2(t)$  with its known temperature relation; (c) the instant of melting  $t_s$  of the weld material is determined by comparing  $T(t)$  with the melting temperature  $T_s$  of the weld material; and (d) the expected diameter of the weld blob at the end of the welding process is calculated from  $t_s$ . The ultrasonic waves used are longitudinal waves. The instantaneous volume of the weld blob is calculated from the attenuation of the shear waves produced in the weld spot. The electrode diameter is determined from the welding current intensity.